研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求

焦念志

厦门大学 海洋与地球学院 厦门 361005

摘要 应对气候变化的关键是实现碳中和。实现碳中和的基本途径包括“减排”（减少向大气中排放 CO_2）和“增汇”（增加对大气中 CO_2 的吸收）。我国作为碳排放大国和发展中国家，应在尽可能减排的同时想方设法增汇，也即研发负排放的方法与途径，这是实现碳中和的必由之路，应强调主动作为。海洋是地球上最大的活跃碳库，有着巨大的碳汇潜力和负排放研发前景。我国的海洋碳汇理论研究已走在国际前沿，并推动了科学与政策的连接。当前，应从顶层设计、及时布局，对外引领国际大科学计划，对内结合国情大力研发海洋负排放技术，打造负排放生态工程；建立海洋碳汇标准体系，并通过大科学计划将其推向世界，占领国际制高点，为实现碳中和宏伟目标提供有力的科技支撑。

关键词 碳中和，负排放，海洋碳汇，微型生物碳泵

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20210123001

工业革命以来，人类活动大量排放 CO_2，导致气候变化加剧，引发一系列环境和社会问题，威胁着人类社会可持续发展。应对气候变化已超越科技领域，成为国际政治和经济中的热点问题。2020 年 9 月 22 日，国家主席习近平在第 75 届联合国大会一般性辩论上提出中国“努力争取 2060 年前实现碳中和”的宏伟目标[1]。这是中国向全世界的郑重承诺，彰显了大国责任，提升了我国的国际影响力。据气候行动追踪组织（CAT）预测，中国碳中和目标将使全球在 21 世纪的升温减少 0.2℃—0.3℃[2]。中国碳中和战略关乎全球气候变化，举世瞩目。然而，中国从碳排放峰值到碳中和的过渡期只有 30 年时间，短时间内实现碳中和目标需要牺牲传统经济和付出巨大的代价。美国波士顿咨询公司估计，中国需要在传统行业上投入 90 万亿—100 万亿元人民币才能实现“2060 年碳中和”的目标①。对于碳中和而言，减排（减少向大气中排

资助项目：国家自然科学基金委重大研究计划项目（91751207），国家自然科学基金委-联合国环境规划署联合资助项目（41861144018）

修改稿收到日期：2021年1月22日；预出版日期：2021年1月23日

① 陈白平，陆怡，刘恭毅，等. 中国气候路径报告. 美国波士顿咨询公司（BCG），2020-10-21.

放 CO_2）和增汇（增加对大气 CO_2的吸收）是两条根本路径，但当前世界各国的关注点集中在减排措施，而对增汇手段重视不足。作为碳排放大国和发展中国家，中国在尽可能减排的同时必须想方设法增汇来减轻减排的压力，也即研发负排放的方法与途径。其实，负排放在发达国家也已成为必要的行动，2019 年美国国家科学院、美国国家工程院和美国国家医学科学院联合发表了《负排放技术与可靠的碳封存：研究议程》（*Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*）报告[3]。显然，负排放是实现碳中和的必由之路。

1 全球碳中和日程及对海洋碳汇的认识

目前，全世界已有 85 个国家提出碳中和目标，包括 27 个欧盟国家、58 个非欧盟国家。这些国家的碳排放占全球排放超过 40%。其中，有 29 个国家明确了碳中和时间表②。不丹已经实现碳中和；挪威、乌拉圭将在 2030 年实现碳中和；芬兰、奥地利、冰岛、瑞典分别将在 2035 年、2040 年、2045 年实现碳中和。还有 20 多个国家计划 2050 年实现碳中和；其中，英国、德国、法国、西班牙、丹麦、匈牙利、新西兰等国家以法律形式加以保障。在中国、美国、印度、俄罗斯 4 个最大碳排放国当中，中国是第一个提出碳中和日程的国家。中国的这一重大举措无疑会带动其他碳排放大国加快减排进程。在不断向碳中和目标迈进的过程中，中国将有机会增进与其他国家的相关交流与对话，进一步提升国际影响力；同时，在中国领先的减排和增汇领域与其他发展中国家展开经济技术合作，将实现互惠互利、合作共赢，推动人类命运共同体的构建。

早在 2014 年，《联合国气候变化框架公约》第 20 轮缔约方会议（COP20）上，中国政府首次表示 CO_2 排放量在 2016—2020 年间将控制在每年 100 亿吨以下，并将在 2030 年左右达到峰值。按当时的排放走势，达峰时中国的 CO_2 排放量最高可达 150 亿吨/年；而就当前的走势看，达峰时将约为 113 亿吨/年。即便是以达峰时排放为 113 亿吨/年为依据，如果要在达峰后“保持排放稳中有降”，可考虑保持目前 2/3—1/3 的排放量，意味着中国每年还有约 40 亿—80 亿吨的 CO_2 当量需要依靠替代能源或者负排放来中和。据美国科学家估计，即便充分利用了替代能源，中国达峰后每年仍有 25 亿吨的负排放缺口③。因此，要实现碳中和目标，必须同时采取减排和增汇措施。

以往的增汇主要靠陆地的植树造林。由于农田稀缺和未来人口增长对粮食的需求矛盾不断凸显[4]，单靠陆地植被增汇已无法满足全球碳中和需求。海洋是地球上最大的活跃碳库，海洋碳库是陆地碳库的 20 倍、大气碳库的 50 倍[5]。海洋每年吸收约 30% 的人类活动排放到大气中的 CO_2，并且海洋储碳周期可达数千年，从而在气候变化中发挥着不可替代的作用[6]。因此，海洋负排放潜力巨大，是当前缓解气候变暖最具双赢性、最符合成本-效益原则的途径。

国际社会日益认识到海洋碳汇的价值和潜力。过去几年里，保护国际（CI）和政府间海洋学委员会（IOC）等联合启动了“蓝碳动议”（The Blue Carbon Initiative）④，成立了碳汇政策工作组和科学工作组，发布了《政策框架》《行动国家指南》《行动倡议报告》等一系列海洋碳汇报告。美国国家海洋和大气

② 邓旭，谢俊，滕飞．何谓“碳中和”．气候变化研究进展，[2021-01-20]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5368.P.20201224.1604.006.html.

③ Fuhrman J, Clarens A F, Mcjeon M. China’s 2060 carbon neutrality goal will require up to 2.5 Gt CO_2/year of negative emissions technology deployment. [2020-10-13]. https://www.researchgate.net/publication/344662708_China’s_2060_carbon_neutrality_goal_will_require_up_to_25_GtCO2year_of_negative_emissions_technology_deployment.

④ https://www.thebluecarboninitiative.org.

管理局（NOAA）从市场机会、认可和能力建设、科学发展3个方面提出了国家海洋碳汇工作建议⑤。印度尼西亚在全球环境基金（GEF）的支持下实施了为期4年的"蓝色森林项目"（Blue Forest Project），建立了国家海洋碳汇中心，编制了《印尼海洋碳汇研究战略规划》⑥。此外，肯尼亚、印度、越南和马达加斯加等国已启动盐沼、海草床和红树林的海洋碳汇项目，开展实践自愿碳市场和自我融资机制的试点示范。

2 中国海域自然碳汇潜力

中国领海面积约300万平方公里，纵跨热带、亚热带、温带、北温带等多个气候带。其中，南海毗邻"全球气候引擎"西太平洋暖池；东海跨陆架物质运输显著；黄海是冷暖流交汇区域；渤海则是受人类活动高度影响的内湾浅海。中国海域内有长江、黄河、珠江等大河输入，外邻全球两大西边界流之一的黑潮。这些自然条件不仅赋予了中国海域巨大碳汇潜力，也给我们提供了实施多种负排放的空间。

中国海岸带蓝碳的碳汇总量相对较小；其中，红树林、盐沼湿地、海草床有机碳埋藏通量为0.36 Tg C·a^{-1}，海草床溶解有机碳（DOC）输出通量0.59 Tg C·a^{-1} [7]。相比之下，开阔海域碳汇量要大得多。据初步估算：中国陆架边缘海的沉积有机碳通量为20.49 Tg C·a^{-1}（陆源有机质向中国陆架边缘海输入的碳汇为17.8 Tg C·a^{-1}）；东海和南海向邻近大洋输送有机碳通量分别为15.25—36.70 Tg C·a^{-1}和43.39 Tg C·a^{-1}；中国大型养殖藻类的初级生产力（即固碳量）约3.52 Tg C·a^{-1}，移出碳通量0.68 Tg C·a^{-1}，沉积和DOC释放通量分别为0.14 Tg C·a^{-1}和0.82 Tg C·a^{-1} [7]；此外，通过实施人工上升流工程可以使得养殖区域增加固碳0.09 Tg C·a^{-1}，结合海藻养殖区实施可获碳汇量在3.61 Tg C·a^{-1}以上。

综上，中国海域储存及向大洋输出碳量约为100 Tg C·a^{-1}，相当于每年342 Tg CO_2。显然，单靠自然海洋碳汇不足以实现碳中和，必须研发海洋负排放方法技术。如果得以实施，则可成倍增加海洋碳汇储量。

3 中国海洋负排放研发的基础与储备

中国科学家提出的"海洋微生物碳泵"（MCP）理论阐释了微生物转化有机碳、生成惰性溶解有机碳（RDOC）的储碳机制[8]。MCP突破了经典理论中依赖颗粒有机碳沉降和埋藏的经典理论，解开了储存于海洋水体中巨大溶解有机碳库的成因之谜[9]，被*Science*评论为"巨大碳库的幕后推手"[10]。2008年，国际海洋科学研究委员会（SCOR）专门设立了MCP科学工作组。2015年，北太平洋海洋科学组织（PICES）和国际海洋考察理事会（ICES）再设MCP联合工作组以促进科学与政策的连接。2016年，中国科学家在著名国际学术品牌——美国"戈登研究论坛"领衔发起创建海洋碳汇永久论坛。2019年，在联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》（SROCCC）中纳入了MCP理论，以及相关的陆海统筹减排增汇和海水养殖区人工上升流增汇等"中国方案"。

在国内，早在2011年笔者提出的《研发海洋碳汇保障经济发展》建议就获得国家发展和改革委员会"十二五建言献策表彰大会优秀提案一等奖"。2013年，首届中国科学院"跨学部科学与技术前沿论坛"就以"陆海统筹研发海洋碳汇"为主题。同年，国内30多个涉海科研院校及相关部委和企业成立了以基

⑤ https://www.nesdis.noaa.gov.
⑥ https://gefblueforests.org/about.

础研究引领、涵盖政、产、学、研、用的全国海洋碳汇联盟（COCA）。2014 年，COCA 推出“中国蓝碳计划”。2015 年，“海洋碳汇”被纳入党中央、国务院印发的《生态文明体制改革总体方案》。2017 年，“海洋碳汇”被遴选为中国科学院旨在打造国际学术品牌的首届“雁栖湖会议”的主题。2020 年 11 月，在海洋生态经济国际论坛上，COCA 发布了《实施海洋负排放，践行碳中和战略倡议书》；12 月，召开“海洋负排放支撑碳中和”专题研讨会；同月，我国相关涉海大学在政府有关部门支持下成立了“海洋负排放研究中心”“碳中和创新研究中心”等机构。至此，我国开展海洋负排放技术研发的条件已经具备。

4 中国海洋负排放研发的对策与建议

目前，国际上海洋碳汇研发最多的是海岸带蓝碳，即红树林、海草、盐沼等类似陆地植被的碳汇形式。然而，我国海岸带蓝碳总量有限，无法形成碳中和所需的巨大碳汇量，因此必须开发其他负排放途径。

4.1 实施陆海统筹负排放生态工程

陆源营养盐大量输入近海，不仅导致近海环境富营养化、引发赤潮等生态灾害，而且使得海水中有机碳难以保存。尤其是陆源输入有机碳（约占陆地净固碳量的 1/4，约 0.5 Gt）[11,12]大部分都在河口和近海被转化成 CO_2 释放到大气，导致生态系统中生产力最高的这类海区反而成为排放 CO_2 的源[13-15]。如何将其恢复到汇，是一项艰巨的任务，必须陆海统筹。

基于 MCP 理论[8,14]，针对中国近海富营养化情况，在陆海统筹理念指导下，合理减少农田的氮、磷等无机化肥用量（目前我国农田施肥过量、流失严重），从而减少河流营养盐排放量，缓解近海富营养化。在固碳量保持较高水平的同时减少有机碳的呼吸消耗，提高惰性转化效率，使得总储碳量达到最大化。即，谋求生物泵（BP）与MCP总量最大化[16]。相应地，建立和完善对近海储碳的评价体系，尤其是在储碳指标中不仅要考虑沉积埋葬的有机碳，而且要纳入以往漏掉的 MCP 产物——惰性溶解有机碳（RDOC）。RDOC 不仅增加近海碳汇，而且可随海流输出到外海。如果到达深海则可实现长期储碳——深海 RDOC 年龄达 4 000—6 000 年[17]。对自然环境中无机氮与有机碳相关性的统计分析表明，在包括土壤、河流、湖泊、水库、河口、近海、陆架海和大洋在内的各种环境中两者之间都呈负相关趋势[18]。这表明，如果环境中有过的营养盐，有机碳就难以储存。在河流、近海及外海的营养盐添加实验也证实了这一结论[19,20]。

据国家统计局数据，过去 50 年里我国化肥施用量增加了近 30 倍。尤其是改革开放初期，化肥产能大增，化肥施用量从 20 世纪 50 年代初的每年不足百万吨爆发式地增长到 70 年代末的每年 1 亿吨，增长了近 100 倍。此后进入稳定增长期，从 1980 年的 1.2 亿吨增长至 2015 年创纪录的 6 亿吨，增长了近 8 倍⑦。由于农业施肥量普遍高于农作物的实际需要，过量的肥料随雨水冲刷进入河流，最后输入近海，这是目前我国河口近岸海洋富营养化的主要原因[21]。而富营养化的后果除了众所周知的“赤潮”之外，近 10 年来我国近海还发生了“绿潮”，其规模达到了惊人的程度（图 1a），所造成的环境压力和经济损失可想而知[22]。一个鲜明的对比是加拿大东北部某森林河口的情景（图 1b）。单从水色看，后者水质似乎很差，若按我国化学需氧量（COD）国家标准判断应属超 V 类水；然而，这是一个误区。事实上，这种森林河流水质并不差，营养盐含量很低，溶解氧充足，鳗鱼生活得很好（图 1c）。看上去似乎有害的颜色实际上是富

⑦ 2020—2026 年中国海水养殖行业市场经营风险及投资风险研究报告 . 智研咨询集团 , 2020.

含有机质的表象，就像人们日常喝的茶水一样。在环境条件不变的情况下这些有机质可以长期保存、形成碳汇，其浓度超过 1 000 μmol/L，储碳量是我国海区海水有机碳浓度的 10 倍以上。显然，陆海统筹减排增汇是一项成本低效益高的海洋负排放途径。







图 1 中国和加拿大近海环境条件与水质比较（两个极端案例）——（a）中国近海富营养化诱发的“绿潮”造成一系列生态环境问题；（b）加拿大东北部近河口的褐色水貌似污染，其实是储存了大量有机碳；（c）鳗鱼在加拿大东北部富有机质的河口褐色水中正常生活

Figure 1 Contrasting extreme cases in eutrophic and oligotrophic coastal waters in China (a) and Canada (b) respectively, and eels live in brown water of latter in Canada (c)

在新认识、新理论指导下，以大江大河为主线，结合本地实际情况因地制宜采取有效措施，量化生态补偿机制，可望一举多得。通过制定有关的方法、技术、标准、规范，科学量化生态补偿机制，践行“绿水青山就是金山银山”理念，促成驱动经济与社会可持续发展的“国内大循环”新模式。

4.2 研发缺氧/酸化海区的负排放技术

海水缺氧、酸化已经成为全球近海普遍存在的严重环境问题，直接导致渔业资源退化、生物多样性下降，生态系统可持续性发展面临风险。针对这些问题，我国科学家提出了利用厌氧条件实施负排放的原理和技术方案[23]，通过建立基于微生物碳泵、生物泵和碳酸盐泵原理的综合负排放途径，可望在实现增汇的同时，缓解环境问题[24]。其主要原理是在缺氧、酸化的环境里，通过施加矿物、增加碱度，提高自生碳酸盐产量，并与有机碳一起埋葬，实现综合储碳增量的效果。这其中的一个关键调节机制是碱度，碱度可缓冲海洋碳酸盐平衡体系在自然或人为扰动下的变化，特别是海洋酸化。增强海洋碱化的方法有多种。例如 1 mol 的橄榄石可螯合 4 mol 的 CO_2。微生物厌氧代谢与碳氮硫循环耦联互馈作用是海洋生态系统中大量碳沉积的重要机制，可望再现地球历史上曾经出现过的大规模海洋储碳[25]。

4.3 实施海水养殖区综合负排放工程

我国拥有世界上最大的海水养殖产业，是海洋经济的重要组成部分⑧。为了减少对自然资源的捕捞压力，保障人民群众所需的动植物蛋白和食品，今后还要进一步发展海水养殖业。不仅我国是这样，随着全球人口的增长和资源的进一步匮乏，全球对水产品的需求也在不断增长。我国的成功经验可以向世界各国推广。然而，由大规模养殖带来的生态

⑧ North Pacific Marine Science Organization. Working Group 33: Joint PICES / ICES Working Group on Climate Change and Biologically-driven Ocean Carbon Sequestration (https://meetings.pices.int/members/working-groups/disbanded/wg33); Working Group 46: Joint PICES/ICES Working Group on Ocean Negative Carbon Emissions (ONCE) (https://meetings.pices.int/members/working-groups/wg46).

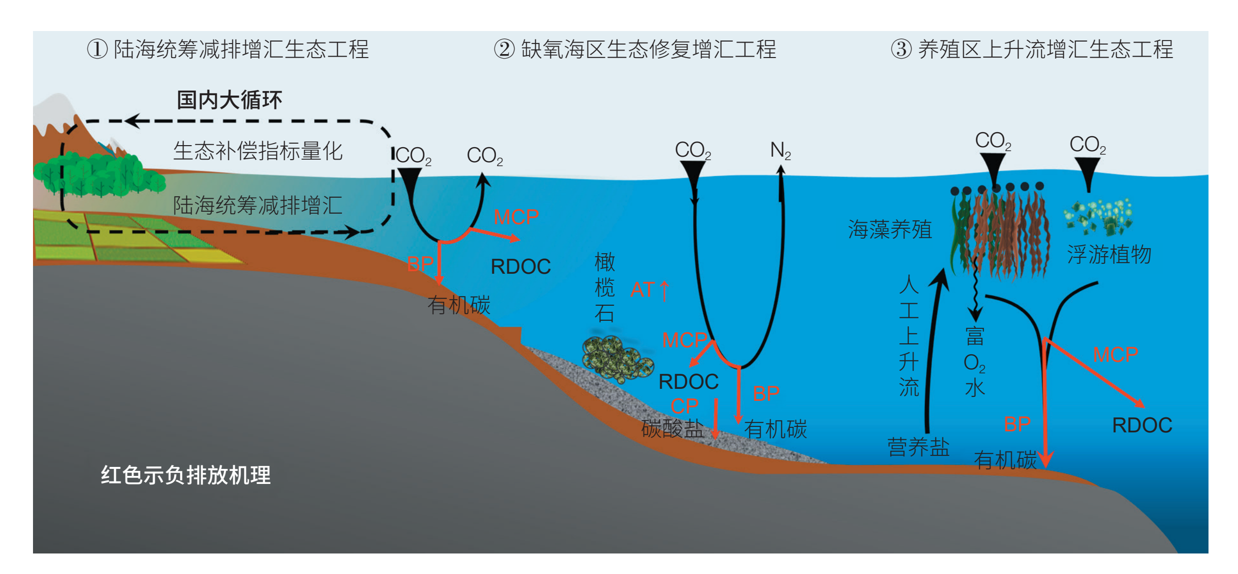


图 2　海洋负排放生态工程案例示意图

Figure 2　Schematic illustration of eco-engineering approaches for ocean negative emissions

AT，碱度；BP，生物泵；MCP，微生物碳泵；CP，碳酸盐泵；RDOC，惰性溶解有机碳

AT, alkalinity; BP, biological pump; MCP, microbial carbon pump; CP, carbonate pump; RDOC, refractory dissolved organic carbon

负荷和环境压力，特别是养殖区海底有机物污染，以及由此带来的氮磷营养盐、无机碳、溶解氧供需错位，构成生态风险，引发的富营养化、缺氧、酸化问题亟待解决。

IPCC 最近发布的《气候变化中的海洋与冰冻圈特别报告》中，纳入了我国科学家建议的“基于生态系统内部调节理念的人工上升流举措”，可望应对大规模养殖带来的生态负荷和环境压力，解决营养盐、无机碳、溶解氧供需错位问题。也就是，通过太阳能等清洁能源驱动的人工上升流可把养殖海区底部富营养盐的水带到上层水体，供给养殖海藻光合作用所需营养盐。与此同时，这个过程把底部高浓度营养盐缓慢释放出来，可避免风暴潮等突然扰动引发的赤潮等生态灾害。此外，补偿性水体混合把表层富含氧气的水带到深层，可缓解底部缺氧的问题。在科学评估、统筹海水养殖容量及其对海洋碳汇贡献的基础上，研发兼顾环境与经济的优化养殖增汇模式，可望打造可持续发展的健康养殖模式和海洋负排放综合工程样板（图 2 中的“③ 养殖区上升流增汇生态工程”）。

4.4 研制海洋碳汇标准体系

国际上研究最多的海洋碳汇组分是看得见、摸得着的红树林等海岸带蓝碳，但由于其总量有限，除了生态系统服务功能之外，难以起到应对气候变化的作用。真正能影响气候变化的其他海洋碳汇成分，因为涉及地球系统各圈层之间碳量传输，包括大气层、水圈、生物圈、岩石圈等，需要不同学科之间的整合研究，才能建立起行之有效的监测技术、评估方法和标准体系。迄今，国际上尚无对海洋碳汇计量的统一规范和标准。制定海洋碳汇标准体系是摆在我们面前的一个重要任务。

中国碳市场是全球配额成交量第二大的市场，但海洋碳汇标准体系仍是空白。因此，需要组织整合海洋负排放相关的不同学科交叉融合，加快海洋碳中和核算机制与方法学研究，建立海洋碳指纹、碳足迹、碳标识相应的方法与技术、计量步骤与操作规范、评价标准，建立健全海洋碳汇交易体系。

4.5 引领海洋负排放国际大科学计划

中国科学家发起的海洋负排放国际大科学计划（ONCE）得到国际同行积极响应和国际科学组织（ICES-PICES）批准[⑨]。截至2019年，已有14个国家的代表科学家签约实施ONCE。2020年已有若干ONCE同行获得所在国/所在地区资助。欧盟已经资助了德国科学家领衔的716万欧元的研究项目。中国应尽快实施ONCE大科学计划、建立和完善应对气候变化的海洋负排放科学规划和工程技术体系，通过ONCE推出中国领衔制定的海洋碳汇/负排放有关标准体系，为全球治理提供中国方案。

参考文献

1 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话. 人民日报, 2020-09-23(01).

2 李嘉宝. 积极践行低碳排放 深度参与国际合作 中国为全球环境治理作贡献. 人民日报海外版, 2020-11-24(10).

3 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration. Pittsburgh: National Academies Press, 2019.

4 张叶生, 王珊. 耕地现状和人口增长对粮食安全的影响分析. 农业部管理干部学院学报, 2011, (1): 35-39.

5 Friedlingstein P, Michael O S, Matthew W J, et al. Global carbon budget 2020. Earth System Science Data, 2020, 12(4), 3269-3340.

6 Boyd W P, Claustre H, Levy M, et al. Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. Nature, 2019, 568: 327-335.

7 Jiao N. Carbon pools and fluxes in the China Seas and adjacent oceans. Science China Earth Sciences, 2018, 61(11): 5-33.

8 Jiao N, Herndl G J, Hansell D A, et al. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. Nature Reviews Microbiology, 2010, 8(8): 593.

9 Barber R T. Dissolved organic carbon from deep waters resists microbial oxidation. Nature, 1968, 220: 274-275.

10 Stone R. The invisible hand behind a vast carbon reservoir. Science, 2010, 328: 1476-1477.

11 Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. Nature Geoscience, 2013, 6(8): 597-607.

12 Bauer J E, Cai W J, Raymond P A, et al. The changing carbon cycle of the coastal ocean. Nature, 2013, 504: 61-70.

13 Laruelle G, Durr H, Slomp C, et al. Evaluation of sinks and sources of CO_2 in the global coastal ocean using a spatially-explicit typology of estuaries and continental shelves. Geophysical Research Letters, 2010, DOI: 10.1029/2010GL043691.

14 Jiao N, Tang K, Cai H, et al. Increasing the microbial carbon sink in the sea by reducing chemical fertilization on the land. Nature Review Microbiology, 2011, 9: 75.

15 Chen C T A, Borges A V. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO_2. Deep-Sea Research, 2009, 59(8): 578-590.

16 Jiao N, Robinson C, Azam F, et al. Mechanisms of microbial carbon sequestration in the ocean—future research directions. Biogeosciences Discussions, 2014, 11(19): 5285-5306.

17 Druffel E R M, Williams P M, Bauer J E, et al. Cycling of dissolved and particulate organic matter in the open ocean. Journal of Geophysical Research Oceans, 1992, 97(10): 15639-15659.

18 Taylor P G, Townsend A R. Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea. Nature, 2010, 464: 1178-1181.

19 Rosemond A D, Benstead J P, Bumpers P M, et al. Experimental nutrient additions accelerate terrestrial carbon loss from stream ecosystems. Science, 2015, 347: 1142-1145.

20 Liu J, Jiao N, Tang K. An experimental study on the effects of nutrient enrichment on organic carbon persistence in the western Pacific oligotrophic gyre. Biogeosciences, 2014, 11(18): 5115-5122.

21 Rabalais N N, Díaz R J, Levin L A, et al. Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia. Biogeosciences, 2010, 7(2): 585-619.

22 Zhang Y. Ulva prolifera green-tide outbreaks and their environmental impact in the Yellow Sea, China. National Science Review, 2019, 6(4): 225-238.

23 Jiao, N, Liu J, Jiao F, et al. Microbes mediated comprehensive carbon sequestration for negative emission in the ocean. National Science Review, 2020, DOI: 10.1093/nsr/nwaa171.

24 Jiao N, Wang H, Xu G, et al. Blue carbon on the rise: Challenges and opportunities. National Science Review, 2018, 5: 464-468.

25 Schrag D P, Higgins J A, MacDonald F A, et al. Authigenic carbonate and the history of the global carbon cycle. Science, 2013, 339: 540-543.

Developing Ocean Negative Carbon Emission Technology to Support National Carbon Neutralization

JIAO Nianzhi

(College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract Carbon neutrality is the right means to cope with global warming. The basic approaches to achieve carbon neutralization include reducing CO_2 emissions to the atmosphere and increasing carbon sinks or negative emissions (absorption of atmospheric CO_2). As a developing country and a big emitter, China should try its best to increase carbon sinks while reducing emissions as much as possible. The ocean is the largest active carbon pool on Earth, with great potentials for carbon negative emission. We have established marine carbon sequestration theory, which has laid solid foundation for negative emission and set up the linkage between science and policy. At present, China should take the lead of the international program on the ocean negative carbon emission (ONCE), and put it into practice through top design, timely layout, and development of ONCE technology, and then establish ONCE protocols and standards for carbon trade.

Keywords carbon neutralization, negative emission, marine carbon sink, microbial carbon pump



焦念志 中国科学院院士，厦门大学海洋与地球学院教授。发展中国家科学院院士，美国微生物科学院院士。中国科学院地学部副主任，中国民主同盟中央委员会常委，国务院学位委员会学科组成员，国际海洋研究委员会（SCOR）科学工作组和北太平洋海洋科学组织（PICES）-国际海洋探索理事会（ICES）联合工作组（WG33）主席。《中国科学：地球科学》副主编，*Embio*、*Applied and Environmental Microbiology*等期刊编委；在*Science*、*Nature*子刊、*PNAS*、*National Science Review*、*ISME Journal*等发表学术论文300余篇。E-mail: jiao@xmu.edu.cn

JIAO Nianzhi Academician of Chinese Academy of Sciences (CAS), Deputy Director of the 15th, 16th Standing Committee of the Earth Sciences Division, CAS; Fellow of the World Academy of Sciences for the advancement of science in developing countries; Fellow of the American Academy of Microbiology; Cheung Kong Chair Professor; Chair of Working Group under the Scientific Committee for Oceanic Research, and the International Committee for Exploration of the Sea and the Pacific Ocean Science Organization. Majored in Aquatic Ecology and Marine Environmental Sciences; has more than 300 publications in scientific journals including *Science* and *Nature* series, *PNAS*, *National Science Review*, *ISME Journal*, etc. E-mail: jiao@xmu.edu.cn

■责任编辑：文彦杰